第40卷 第1期
2023年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 1
Jan. 2023

新疆野苹果幼苗生长及生物量分配对降水量和降水间隔时间的响应

张宗芳， 徐 将， 师小军

（新疆农业大学生命科学学院，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：为揭示不同降水量和降水间隔时间对新疆野苹果幼苗生长的影响，根据试验地多年年均降水量和降水间隔时间，设置3个降水量梯度[W(月平均降水量)、W-(月平均降水量减少15%)和W+(月平均降水量增加15%)]和2个降水间隔时间[T(降水间隔时间为4 d)和T+(降水间隔时间为8 d)]进行野外控制性试验。研究表明：(1) 相同降水间隔时间处理下，幼苗基径、叶片数、地上生物量和地下生物量随降水量的增加而增加；(2) 相同降水量处理下，T+处理能促进主根生长，增加根冠比；(3) 与W处理相比，W+处理的地上生物量、地下生物量和总生物量相对生长速率分别平均提高了55.42%、20.75%和34.43%。延长降水间隔时间促进新疆野苹果幼苗根的生长和地下生物量的积累，在一定降水范围内增加降水量可促进其幼苗的生长和生物量的积累。

关键词：新疆野苹果；降水量；降水间隔时间；幼苗生长

在全球气候变化的大环境下，未来年际降水量和降水频率将会发生变化[1-2]。降水是种子萌发和幼苗生长所需水分的主要来源，土壤水分是植物生长的重要条件之一。未来降水量和降水间隔时间的变化会影响土壤水分的有效性，进而影响植物的生理生态特性，最终影响植物种群更新和延续[3-5]。

目前，生态学家已经开展了许多关于降水变化对陆地生态系统结构与功能影响的研究，涉及植物生长、物种组成和群落结构等方面[6-9]。在植物更新方面，植物在种子产生、扩散、萌发和幼苗建成等生活史阶段都会产生更新限制，其中植物幼苗生长的早期阶段对水分条件变化最为敏感，易受降水变化的影响[10-13]。国内外研究表明，全球气候变化导致的降水变化将加强或抑制植物幼苗的更新。降水量的增加促进幼苗生物量的积累，降低根冠比，如内蒙古草原植物大针茅(*Stipa grandis*)、荒漠生态系统的沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)和暖温带地区的辽东栎(*Quercus mongolica*)等[14-18]。降水间隔时间的变化影响幼苗生物量的分配，如红砂、黧蒴锥(*Castanopsis fissa*)和白刺等[19-22]。增加降水量和延长降水间隔时间的交互作用促进幼苗地上、地下和总生物量积累，如红砂和白刺[14,16,22]。以上研究表明，在降水变化的环境下，植物会采取相应的生长策略来适应环境的变化，调节幼苗生长来适应降水变化。因此，幼苗生长对降水变化的响应及其适应性特征会直接影响未来幼苗更新成功与否，进而影响种群更新动态[23-25]。

伊犁河谷是地处中亚干旱区的湿岛，对气候变化较为敏感，近些年，该区域年降水量呈升高趋势，可能会影响该地区的森林动态[26-28]。新疆野苹果(*Malus sieversii*)属蔷薇科(Rosaceae)苹果属(*Malus*)多年生乔木，是伊犁河谷的优势树种，在我国主要分布于伊犁的新源县、巩留县和霍城县等地[29]，是栽培苹果的祖先种，也是我国二级濒危保护植物[30-31]，具有耐寒性和耐旱性等多种抗逆性性状[32-34]。目前对新疆野苹果的研究主要聚焦于在种群生存和病虫害现状[35]、核心种质资源的建立[36]和种群遗传特征[29]等方面。据报道，预计本世纪末全球平均气温将会升高2~7 ℃[37]，随着全球气候变暖的趋势，降水

收稿日期：2022-05-21； **修订日期**：2022-07-12
基金项目：国家自然科学基金项目(31960229)；新疆维吾尔自治区自然科学基金(2017D01B17)
作者简介：张宗芳(1994-)，女，硕士研究生，主要从事种子生物学与植物生活史进化的研究. E-mail: zzf15725151359@163.com
通讯作者：师小军. E-mail: sxj61506@163.com

量的年际变化和极端降水事件的发生频率在不断变化[38]。有研究发现2014—2017年分布在新源县的新疆野苹果,一半以上的实生苗因干旱原因很难存活到当年秋天[39],而降水量和降水间隔时间的变化对新疆野苹果幼苗生长的影响鲜有报道。因此,本文以新疆野苹果为研究对象,探讨新疆野苹果幼苗各部分生物量分配及生长规律对降水量和降水间隔时间变化的响应和差异。从理论上揭示降水变化对新疆野苹果种群更新的影响,同时为伊犁河谷的森林育苗管理及新疆野苹果幼苗更新提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究地点

试验地位于新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州新源县伊犁植物园(83°61′E,43°38′N),属于温带大陆性气候[40],年平均气温为10.0 ℃,年降水量为580 mm,海拔约为1380 m。新疆野苹果为主要树种,伴生种有野山楂(*Crataegus cuneata*)、野杏(*Armeniaca vulgaris*)和新疆野核桃(*Juglans regia*)等乔木,荨麻(*Urtica fissa*)、牛蒡(*Arctium lappa*)和鸭茅(*Dactylis glomerata*)等优势草本植物[41]。

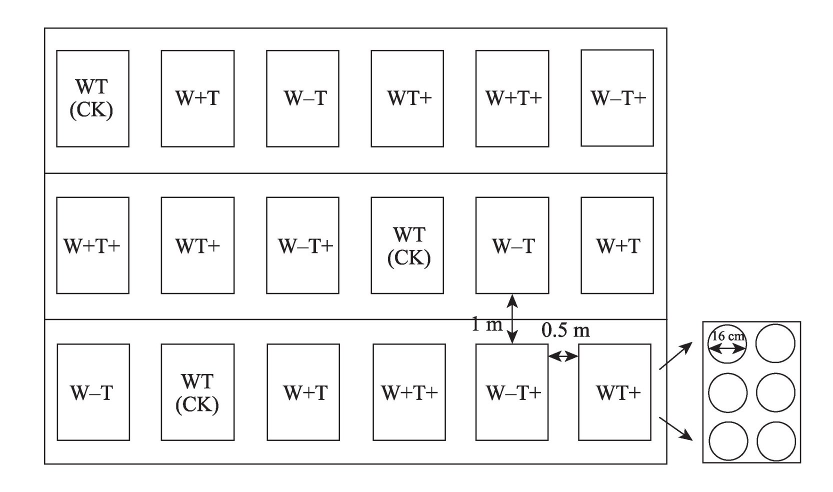
1.2　研究材料

2020年8月在伊犁新源县伊犁植物园采集成熟的新疆野苹果果实并取出种子,种子千粒重为26.66 g。据研究发现,新疆野苹果种子层积90 d时休眠被打破[42],将成熟饱满的种子放置于2 ℃冰箱内进行冷层积90 d以打破休眠;层积结束后,将种子去皮浸泡在0.5% TTC(2, 3, 5-氯化三苯基四氮唑)试剂下处理6 h,95%以上种子具有活力。

1.3　研究方法

1.3.1　模拟降水量和降水间隔时间的设置　根据伊犁新源县野果林安装的Davis自动气象站多年(2017—2020年)统计资料,多年平均降水量为580 mm,年均最高降水量约为660 mm,比多年平均降水量高出约15%,年均最低降水量约为500 mm,比多年平均降水量水平低15%。试验将多年月平均自然降水量设置为对照,在月平均降水量的基础上增减15%,分别用W、W+和W-表示。此外,由气象资料统计得出平均降水间隔时间约为4 d。因此,本试验设置降水间隔时间为4 d模拟自然降水频率,降水间隔时间为8 d来模拟降水间隔时间较长的大降水事件,分别用T和T+表示。模拟降水量和降水间隔时间,共设置6个降水处理: WT、W-T、W+T、WT+、W-T+、W+T+。

1.3.2　试验设置　在试验地内选取地势较为平坦的4 m×5 m样方,将样方分成18个小样区,每个小样区间距为0.5 m,如图1所示。4月8日进行播种,每个小样区放置6个直径为16 cm、深度为15 cm花盆,将20粒已打破休眠的种子播种于塑料花盆中,土壤为山地黑棕色土,播种深度为2 cm。播种后每天浇水,使土壤保持湿润,保证幼苗出土。6月8日,每盆保留6株生长良好、株高和基径基本一致的幼苗开始进行降水处理。样方上设置遮雨棚,与地面相距



注:T表示降水间隔时间为4 d;T+表示降水间隔时间为8 d;W表示降水量;W-表示降水量减少15%;W+表示降水量增加15%。下同。

图1　试验设计图

Fig. 1　Diagram of the experiment design

约0.5 m，保证四周通风以避免温室效应，在整个试验期间，阴天和有降水时进行遮盖，防止自然降水影响试验结果。模拟降水在同一天的20:00—22:00内完成以防止水分蒸发，使用量筒和烧杯量取设定的降水量后均匀的洒入花盆中，降水量和降水间隔时间如表1所示。在生长季（7月8日—9月8日）每月取样1次，每个处理随机选取3株幼苗测量各生长指标以探讨降水量和降水间隔时间对新疆野苹果幼苗生长的影响。

1.3.3　幼苗生长指标　幼苗取样前，使用游标卡尺测量幼苗株高、基径，记录叶片数，使用小铲子挖出幼苗根系后再测量其主根长。将幼苗洗净后放入信封内带回实验室，置于85 ℃烘箱内烘干至恒重，使用电子天平称重。选取生长季末期（9月8日）幼苗的各项指标以探讨降水量和降水间隔时间对幼苗生长的影响。其中相对生长速率公式中幼苗初始生物量的取样时间为6月8日，最终生物量的取样时间为9月8日。

$$根冠比 = 地下生物量/地上生物量 \quad (1)$$

$$相对生长速率 = (\ln W_2 - \ln W_1)/\Delta t \quad (2)$$

式中：W_1为初始生物量（g）；W_2为最终生物量（g）；Δt为两次测量之间的时间间隔[43-44]。

1.4　数据分析

利用SPSS 22.0进行数据分析，分析的数据首先符合正态分布和方差齐性，再使用单因素方差分析比较幼苗株高、基径、主根长和叶片数的差异，使用双因素方差分析比较降水量和降水间隔时间交互作用对幼苗地上、地下和总生物量及相对生长速率的差异，使用LSD法进行差异显著性分析（α=0.05），最后使用Origin 2021软件制图。

2　结果与分析

不同降水量和降水间隔时间对幼苗株高、基径、主根长和叶片数均具有显著性影响（表2，P<0.05）。相同降水量处理下，T处理的幼苗株高均高

表1　试验中的降水设置

Tab. 1　Precipitation setting in the experiment

处理时间	月平均降水量/mm	降水间隔时间	平均降水量/mm		
			W−	W	W+
6月	84.80	T	9.01	10.60	12.19
		T+	18.02	21.20	24.38
7月	53.20	T	5.65	6.65	7.65
		T+	11.31	13.30	15.30
8月	49.07	T	5.21	6.13	7.05
		T+	10.43	12.27	14.11
9月	37.13	T	3.94	4.64	5.34
		T+	7.89	9.28	10.67

注：T表示降水间隔时间为4 d；T+表示降水间隔时间为8 d；W表示降水量；W−表示降水量减少15%；W+表示降水量增加15%。下同。

表2　不同降水量和降水间隔时间下新疆野苹果幼苗株高、基径、主根长和叶片数的变化

Tab. 2　Dynamics of seedling height, basal diameter, taproot length and leaf number of *Malus sieversii* seedling in different precipitation amount and precipitation interval

处理	株高/mm	基径/mm	主根长/mm	叶片数/个
W−T	90.95±6.20ab	2.24±0.10b	182.54±21.61ab	9.00±1.00b
WT	91.54±12.44ab	3.11±0.36ab	163.17±30.75b	12.33±0.88b
W+T	110.20±8.68a	3.38±0.35ab	242.86±32.10ab	13.00±1.15b
W−T+	78.89±2.26b	2.77±0.26ab	205.63±9.85ab	10.33±1.86b
WT+	76.35±3.49b	3.09±0.18ab	274.37±54.93a	10.67±0.67b
W+T+	86.21±3.83b	3.47±0.14a	230.73±19.84ab	20.00±3.21a

注：不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

于T+处理,延长降水间隔时间使幼苗株高分别降低13.26%、16.59%和21.77%。W-和W处理下,延长降水间隔时间使幼苗主根长分别增加12.65%和68.15%。相同降水间隔时间处理下,幼苗基径随降水量的增加而增加,T和T+处理下,增加15%降水量使基径分别增加8.68%和12.30%;幼苗叶片数随降水量的增加而增加,W+T+处理的幼苗叶片数最多,显著高于其他处理。

双因素方差分析表明,降水量对幼苗地上生物量和地下生物量具有极显著影响(表3,$P<0.01$),降水间隔时间对幼苗地上生物量和地下生物量无显著影响(表3,$P>0.05$)。降水量和降水间隔时间处理下,幼苗地上、地下生物量和根冠比随幼苗生长时间的增加总体呈现增加的趋势(图2)。

表3 降水量和降水间隔时间对新疆野苹果幼苗地上生物量、地下生物量和根冠比影响的双因素方差分析

Tab. 3 Results of Two-way ANOVA on the effects of precipitation and precipitation interval on above-ground biomass, below-ground biomass, and root/shoot ratio of *Malus sieversii* seedlings

变异来源	地上生物量	地下生物量	根冠比	相对生长速率
W	16.859**	7.871**	1.008	15.510***
T	2.592	0.05	3.328	0.436
W×T	0.342	1.139	0.456	1.045

注:*表示显著水平($P<0.05$);**表示极显著水平($P<0.01$);***表示极显著水平($P<0.001$);T表示降水间隔时间;W表示降水量。

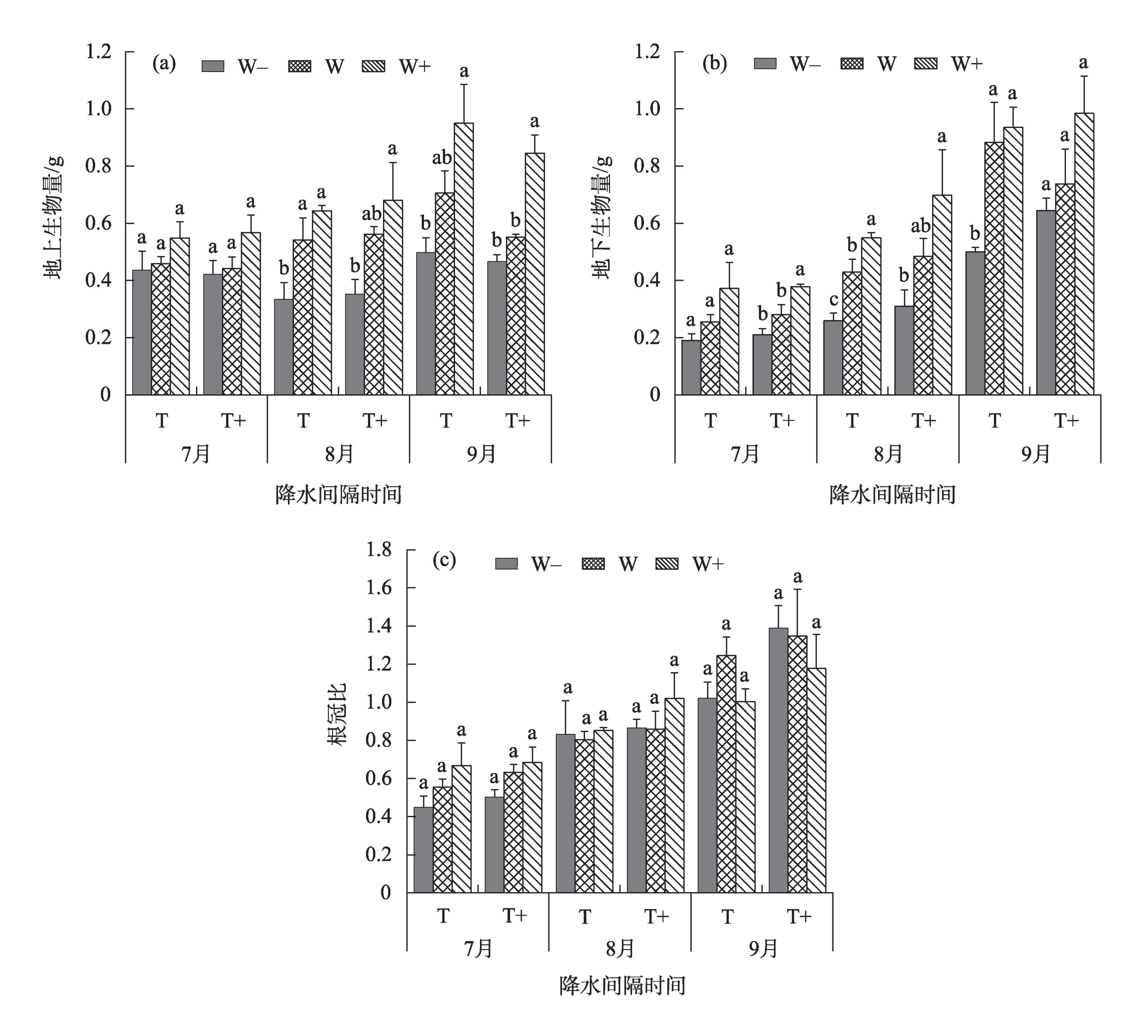


图2 不同降水量和降水间隔时间处理下新疆野苹果幼苗地上生物量、地下生物量和根冠比的变化

Fig. 2 Dynamics of above-ground biomass, below-ground biomass and root/shoot ratio of *Malus sieversii* seedlings in different precipitation amount and precipitation interval

相同降水间隔时间处理下，幼苗地上生物量和地下生物量随降水量的增加而增加，W+处理下的地上生物量和地下生物量最大（图2）。生长季初期（7月8日）在T和T+处理下，不同降水量对地上生物量均无显著性影响（P>0.05）；T+处理下，W+处理的地下生物量显著高于W和W-处理。生长季末期（9月8日）在T和T+处理下，降水量增加15%使幼苗地上生物量分别增加33.80%和44.17%，降水量增加15%使地下生物量分别增加5.68%和32.43%。相同降水量处理下，T+处理的地下生物量高于T处理。不同降水量和降水间隔时间处理的幼苗根冠比均无显著性差异（P>0.05），相同降水间隔时间下，生长季初期，W+处理下幼苗根冠比大于W和W-处理；生长季末期，W+处理下的根冠比低于W-和W处理，W-T+处理下的根冠比最大。

降水量对幼苗生物量相对生长速率具有极显著性影响（表3，P<0.001）。不同降水量处理的幼苗地上、地下和总生物量的相对生长速率存在显著性差异（图3，P<0.05）。相同降水间隔时间处理，幼苗地上、地下和总生物量的相对生长速率随降水量的增加而增加，W+处理下降水量的地上生物量、地下生物量和总生物量相对生长速率显著高于W-处理。与W处理生物量的相对生长速率相比，W+处理下幼苗地上生物量、地下生物量和总生物量相对生长速率分别提高了55.42%、20.75%和34.43%。

3 讨 论

3.1 降水间隔时间对幼苗生长的影响

降水间隔时间的变化会影响植物形态，进而改变幼苗地上生物量、地下生物量的分配[45-46]。有研究表明，延长降水间隔时间使土壤水分蒸发量增加，进而导致幼苗生物量或存活率降低[3,15]；延长降水间隔时间促进幼苗根系的生长，使根冠比增加[22,47]。本研究结果发现延长降水间隔时间促进新疆野苹果幼苗主根生长，与延长降水间隔时间促进红砂幼苗的根生长结果相似[20-22]，这可能是幼苗受到干旱胁迫时，其主根生长以便吸收土壤深层的水分，保证植株正常生长，这是植物应对干旱环境的一种生长策略[18,47-48]。相同降水量处理下，生长季（7—9月）延长降水间隔时间促进新疆野苹果地下生物量的积累和根冠比的增加，与Gao等[15]的研究结果相反，这可能是二者所在生境的地表水分蒸发量和植物的蒸腾作用不同导致两种幼苗根冠比产生的差异。表明植物在受到干旱胁迫时首先关闭一部分气孔，减少水分的蒸腾，为了吸收更多的水分，然后使根系延长，使根冠比增大[44,49]。生长季末期，降水间隔时间的延长使新疆野苹果幼苗地上生物量降低，而地下生物量增加，表明幼苗受到长时间的干旱胁迫时，根系对水分变化的反应敏感，可感应土

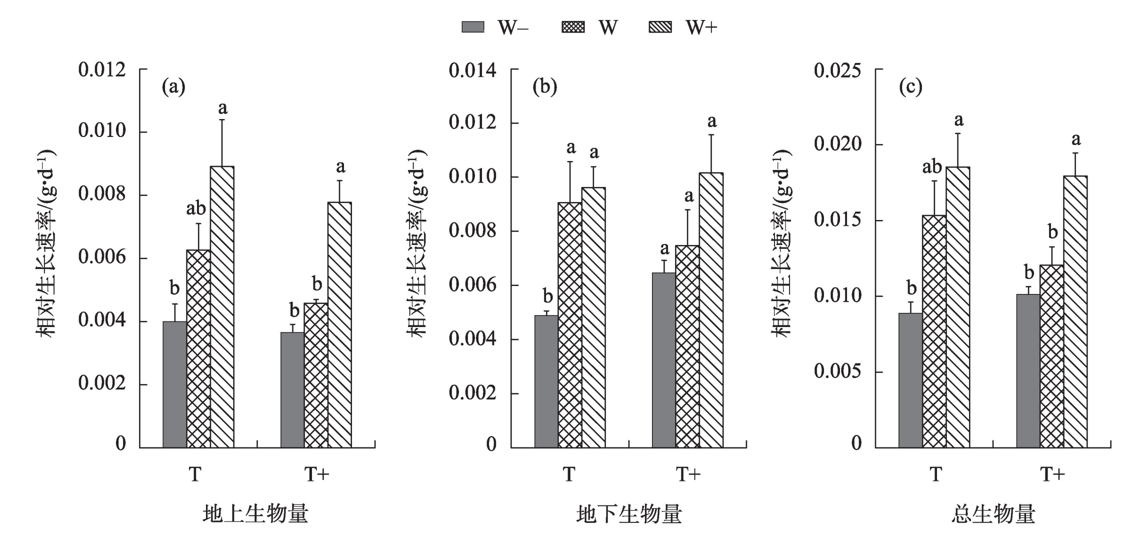


图3 降水量和降水间隔时间对新疆野苹果幼苗地上、地下和总生物量相对生长速率的影响

Fig. 3 Effects of precipitation amount and precipitation interval on relative growth rate of above-ground biomass, below-ground biomass, and total biomass of *Malus sieversii* seedlings

壤水分的可利用性，然后分配较多的生物量给根系，这是植物通过改变其自身形态以适应干旱环境的生长策略[3,43]。

3.2 降水量对幼苗生长的影响

植物受到水分胁迫时，其生长为响应降水量的变化，改变幼苗生物量分配[15]。有研究表明降水量减少50%处理下的宿根羽扇豆（*Lupinus perennis*）的幼苗总生物量显著低于对照处理[3]；也有研究表明增加降水量促进大针茅幼苗地上生物量、地下生物量和总生物量的积累[18]。本研究结果发现，在相同降水间隔时间处理下，新疆野苹果幼苗株高、基径和叶片数随降水量的增加而增加，与降水量对沙蓬和沙柳（*Salix psammophila*）幼苗影响结果相似[15,50]。表明在降水量充足时，幼苗生长较快，表现为株高、基径和叶片数的增加，幼苗将更多的资源分配到地上部分，促进光合作用，从而促进幼苗生物量积累[50-51]。新疆野苹果幼苗株高、基径均随降水量的减少而减少，与吴茜等[52]对秃瓣杜英（*Elaeocarpus glabripetalus*）幼苗生长对降水量变化的响应结果相似，表明在降水量不足时，幼苗将更多的水分分配给根系以探索深层土壤的资源，维持植物正常生长[22]。在相同降水间隔时间处理下，W、W-和W+处理下的新疆野苹果幼苗地上、地下生物量和根冠比随时间的增加呈增加的趋势。

生长季初期，相同降水间隔时间下，W+处理下新疆野苹果幼苗根冠比大于W和W-处理，此结果与增加降水量使红砂幼苗根冠比降低的结果相反[19]，这可能是红砂幼苗降水量的增减幅度为30%，而本试验降水量增减幅度为15%，因降水量变化小，新疆野苹果幼苗对降水变化还没有做出反应；幼苗的地上生物量在每个处理下无显著性差异，而W+T+处理的地下生物量显著高于W-T+和WT+处理，表明新疆野苹果幼苗的根对降水量的变化响应最快，降水量的增加促进了幼苗根系的生长。生长季末，相同降水间隔时间下，W+处理下的根冠比低于W-和W处理，此结果与增加降水量使沙柳幼苗根冠比减少相似[15]，这是因为幼苗受到长期水分胁迫时，会响应降水量的变化，提高地下部分的资源分配以促进水的吸收，使根冠比增加[53]；新疆野苹果幼苗地上生物量和地下生物量随降水量的增加而增加，与辽东栎和红砂幼苗生长对降水量变化的响应结果一致[17,54]，可能是由于降水量的增加，土壤水分充足的条件下，植物将更多的生物量分配到获取光资源的构件中，以促进幼苗光合作用，进而积累更多的有机物，有利于提高幼苗对生长环境变化的适应能力[49]。

W+处理的新疆野苹果幼苗地上生物量、地下生物量和总生物量的相对生长速率显著高于W-处理，且W+处理和T处理的交互作用下幼苗总生物量的相对生长速率最高，与Shan等[44]的研究结果基本一致，表明降水量和降水间隔时间的变化使植物生物量分配策略发生改变，以提高植物应对降水量变化的生存能力。综上所述，在一定范围内，降水量减少对新疆野苹果幼苗生长影响不大，降水量增加会促进其幼苗的生长和生物量的积累，进而增强幼苗的更新能力。因此，新疆野苹果幼苗对未来降水变化具有一定的适应能力。

4 结 论

通过探究不同降水量和降水间隔时间对新疆野苹果幼苗生长和生物量分配的影响得出以下结论：

（1）延长降水间隔时间能够促进新疆野苹果幼苗主根生长，增大根冠比。

（2）降水量增加有助于幼苗株高、基径和叶片数生长。

（3）增加降水量提高幼苗生物量相对生长速率，有利于地上、地下和总生物量的积累。

（4）本研究表明未来降水量增加更有利于新疆野苹果幼苗的生长，为研究降水格局变化下野果林植物更新提供理论依据。

参考文献（References）：

[1] 李克南，杨晓光，刘志娟，等. 全球气候变化对中国种植制度可能影响分析Ⅲ. 中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限的可能影响[J]. 中国农业科学，2010，43(10)：2088-2097. [Li Kenan, Yang Xiaoguang, Liu Zhijuan, et al. Analysis of the potential influence of global climate change on cropping systems in China Ⅲ. The change characteristics of climatic resources in northern China and its potential influence on cropping systems [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(10): 2088-2097.]

[2] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Research, 2011, 47(1): 123-138.

[3] Schneider A C, Lee T D, Kreiser M A, et al. Comparative and interactive effects of reduced precipitation frequency and volume on

the growth and function of two perennial grassland species[J]. International Journal of Plant Sciences, 2014, 175(6): 702–712.

[4] Wilcox K R, Von Fischer J C, Muscha J M, et al. Contrasting above- and belowground sensitivity of three Great Plains grasslands to altered rainfall regimes[J]. Global Change Biology, 2015, 21(1): 335–344.

[5] Wu D, Ciais P, Viovy N, et al. Asymmetric responses of primary productivity to altered precipitation simulated by ecosystem models across three long-term grassland sites[J]. Biogeosciences, 2018, 15(11): 3421–3437.

[6] Hoeppner S S, Dukes J S. Interactive responses of old-field plant growth and composition to warming and precipitation[J]. Global Change Biology, 2012, 18(5): 1754–1768.

[7] Garbulsky M F, Peñuelas J, Papale D, et al. Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems[J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(2): 253–267.

[8] Heisler J L, Weltzin J F. Variability matters: Towards a perspective on the influence of precipitation on terrestrial ecosystems[J]. New Phytologist, 2006, 172(2): 189–192.

[9] Knapp A K, Beier C, Briske D D, et al. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems[J]. BioScience, 2008, 58(9): 811–821.

[10] Nathan R, Muller-Landau H C. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(7): 278–285.

[11] Clark C J, Poulsen J R, Levey D J, et al. Are plant populations seed limited? A critique and meta-analysis of seed addition experiments[J]. The American Naturalist, 2007, 170(1): 128–142.

[12] Münzbergová Z, Herben T. Seed, dispersal, microsite, habitat and recruitment limitation: Identification of terms and concepts in studies of limitations[J]. Oecologia, 2005, 145(1): 1–8.

[13] 武静莲, 王森, 蔺菲, 等. 降水变化和种间竞争对红松和蒙古栎幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 235–240. [Wu Jinglian, Wang Miao, Lin Fei, et al. Effects of precipitation and interspecific competition on *Quercus mongolica* and *Pinus koraiensis* seedlings growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 235–240.]

[14] 段桂芳, 单立山, 李毅, 等. 降水格局变化对红砂幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6457–6464. [Duan Guifang, Shan Lishan, Li Yi, et al. Effects of changing precipitation patterns on seedling growth of *Reaumuria soongorica*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6457–6464.]

[15] Gao R, Yang X, Liu G, et al. Effects of rainfall pattern on the growth and fecundity of a dominant dune annual in a semi-arid ecosystem[J]. Plant and Soil, 2015, 389(1): 335–347.

[16] 单立山, 李毅, 张荣, 等. 降雨格局变化对白刺幼苗根系形态特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7324–7332. [Shan Lishan, Li Yi, Zhang Rong, et al. Response of the root morphology of *Nitraria tangutorum* seedlings to precipitation pattern changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7324–7332.]

[17] 董丽佳, 桑卫国. 模拟增温和降水变化对北京东灵山辽东栎种子出苗和幼苗生长的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(8): 819–830. [Dong Lijia, Sang Weiguo. Effects of simulated warming and precipitation change on seedling emergence and growth of *Quercus mongolica* in Dongling Mountain, Beijing, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(8): 819–830.]

[18] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 等. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1155–1164. [Zhou Shuangxi, Wu Dongxiu, Zhang Lin, et al. Effects of changing precipitation patterns on seedlings of *Stipa grandis*, a dominant plant of typical grassland of Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(10): 1155–1164.]

[19] 段桂芳, 单立山, 李毅, 等. 红砂幼苗根系形态特征对降水格局变化的响应[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 95–103. [Duan Guifang, Shan Lishan, Li Yi, et al. Response of root morphology to precipitation change in *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(10): 95–103.]

[20] Xie Y, Li Y, Xie T, et al. Impact of artificially simulated precipitation patterns change on the growth and morphology of *Reaumuria soongarica* seedlings in Hexi Corridor of China[J]. Sustainability, 2020, 12(6): 2439.

[21] 王俊, 王卓晗, 杨龙, 等. 浇水频率和凋落物覆盖量对黧蒴锥种子萌发及幼苗存活的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2097–2102. [Wang Jun, Wang Zhuohan, Yang Long, et al. Effects of litter coverage and watering frequency on seed germination and seedling survival of *Castanopsis fissa*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2097–2102.]

[22] 单立山, 李毅, 段桂芳, 等. 模拟降雨变化对两种荒漠植物幼苗生长及生物量分配的影响[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1267–1274. [Shan Lishan, Li Yi, Duan Guifang, et al. Effects of simulated precipitation on seedling growth and biomass allocation in two tree species in the arid lands of Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1267–1274.]

[23] 邵佳怡, 杜建会, 李升发, 等. 高山林线生态交错区木本植物幼苗分布特征、更新机制及其对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2854–2864. [Shao Jiayi, Du Jianhui, Li Shengfa, et al. Tree seedling distribution, regeneration mechanism and response to climate change in alpine treeline ecotone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(8): 2854–2864.]

[24] Wu H, Wei X, Jiang M. Intraspecific variation in seedling growth responses of a relict tree species *Euptelea pleiospermum* to precipitation manipulation along an elevation gradient[J]. Plant Ecology, 2021, 222(12): 1297–1312.

[25] Chun X, Ming D, Guang Z, et al. Response of *Salix psammophila* seedlings to simulated precipitation change in Ordas plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 171–176.

[26] 徐娇媚, 徐文修, 张富纬, 等. 近50 a伊犁河谷≥0 ℃和≥10 ℃期

间降水量的时空变化特征分析[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(10): 1806-1813. [Xu Jiaomei, Xu Wenxiu, Zhang Fuwei, et al. The analysis temporal and spatial variation characteristics about the period precipitation of ≥0 ℃ and ≥10 ℃ in Ili River Basin in recent 50 years[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(10): 1806-1813.]

[27] 闫俊杰, 闫敏, 崔东, 等. 近55 a新疆伊犁河谷气温和降水变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(10): 13-16, 12. [Yan Junjie, Yan Min, Cui Dong, et al. Trend analysis of temperature and precipitation in Yilihe basin near the last 55 years[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(10): 13-16, 12.]

[28] 杨霞, 安大维, 周鸿奎, 等. 2012—2017年伊犁河谷冬季降水日变化特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 609-619. [Yang Xia, An Dawei, Zhou Hongkui, et al. Daily variation of winter precipitation in Ili River valley of Xinjiang from 2012 to 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 609-619.]

[29] 张宏祥, 郑田勇. 海拔对新疆野苹果种群遗传特征的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4031-4037. [Zhang Hongxiang, Zheng Tianyong. Effects of elevation on population genetic characteristics of *Malus sieversii*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(12): 4031-4037.]

[30] Aldwinckle H S, Forsline P L, Gustafson H L, et al. Evaluation of apple scab resistance of *Malus sieversii* populations from Central Asia[J]. HortScience, 1997, 32(3): 440.

[31] 陈学森, 毛志泉, 王楠, 等. 新疆落叶果树种质资源评价挖掘与创新利用[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(6): 1483-1490. [Chen Xuesen, Mao Zhiquan, Wang Nan, et al. Progress on evaluation, mining and utilization of germplasm resource of deciduous fruit trees in Xinjiang[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(6): 1483-1490.]

[32] 谭冬梅. 干旱胁迫对新疆野苹果及平邑甜茶生理生化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 980-986. [Tan Dongmei. The physiology and biochemistry of programmed *Malus siversii* and *M. hupehensis* cell death under drought stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(5): 980-986.]

[33] 张静, 赵亮明, 邹志荣. 不同苹果砧木组培苗抗旱性的比较研究[J]. 果树学报, 2013, 30(1): 88-93. [Zhang Jing, Zhao Liangming, Zou Zhirong. Drought resistance of different apple rootstocks in vitro[J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(1): 88-93.]

[34] 郑点, 吴玉霞, 覃伟铭, 等. 新疆野苹果作为苹果砧木利用的研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2019, 38(2): 56-59. [Zheng Dian, Wu Yuxia, Qin Weiming, et al. Advance in research on application of *Malus sieversii* as rootstock[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2019, 38(2): 56-59.]

[35] 阎国荣, 许正. 天山野生果树主要病害及其分布[J]. 干旱区研究, 2001, 18(2): 47-49. [Yan Guorong, Xu Zheng. Study on the wild fruit tree diseases of Tianshan Mountains and their distribution in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2001, 18(2): 47-49.]

[36] Volk G M, Richards C M, Reilley A A, et al. Ex situ conservation of vegetatively propagated species: Development of a seed-based core collection for *Malus sieversii*[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2005, 130(2): 203-210.

[37] Allison I, Bindoff N L, Bindschadler R A, et al. The Copenhagen Diagnosis: Updating the World on the Latest Climate Science[M]. UK: Elsevier, 2009: 49-51.

[38] Heisler-White J L, Blair J M, Kelly E F, et al. Contingent productivity responses to more extreme rainfall regimes across a grassland biome[J]. Global Change Biology, 2009, 15(12): 2894-2904.

[39] 刘忠权, 董合干. 新疆野苹果林野苹果实生苗空间分布及其生存现状——以新源县为例[J]. 新疆农业科技, 2018, 40(5): 37-41. [Liu Zhongquan, Dong Hegan. Spatial distribution and survival status of *Malus sieversii* seedlings in wild apple forest: A case study in Xinyuan County, China[J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2018, 40(5): 37-41.]

[40] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2239-2248. [Tao Ye, Zhang Yuanming, Zhou Xiaobing. Ecological stoichiometry of surface soil nutrient and its influencing factors in the wild fruit forest in Yili region, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2239-2248.]

[41] 陈燕君. 新疆新源县野苹果林资源保护与恢复[J]. 北京农业, 2015, 35(27): 98-99. [Chen Yanjun. Protection and restoration of wild apple forests in Xinyuan County, Xinjiang[J]. Beijing Agriculture, 2015, 35(27): 98-99.]

[42] 闫秀娜, 李芳, 阎国荣, 等. 濒危植物新疆野苹果种子的萌发特性[J]. 天津农学院学报, 2015, 22(2): 33-36. [Yan Xiuna, Li Fang, Yan Guorong, et al. Preliminary exploration on seed germination in endangered plant *Malus sieversii*[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2015, 22(2): 33-36.]

[43] 何莹莹, 于明含, 丁国栋, 等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)幼苗生长及生物量分配对降雨量和降雨间隔的响应[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 183-191. [He Yingying, Yu Minghan, Ding Guodong, et al. Responses of seedling growth and biomass allocation of *Artemisia ordosica* to precipitation and precipitation interval[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 183-191.]

[44] Shan L, Zhao W, Li Y, et al. Precipitation amount and frequency affect seedling emergence and growth of *Reaumuria soongarica* in northwestern China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(4): 574-587.

[45] Didiano T J, Johnson M T, Duval T P. Disentangling the effects of precipitation amount and frequency on the performance of 14 grassland species[J]. PLoS One, 2016, 11(9): e0162310.

[46] Slette I J, Blair J M, Fay P A, et al. Effects of compounded precipitation pattern intensification and drought occur belowground in a mesic grassland[J]. Ecosystems, 2022, 25: 1265-1278.

[47] Fay P A, Carlisle J D, Knapp A K, et al. Productivity responses to altered rainfall patterns in a C_4-dominated grassland[J]. Oecologia, 2003, 137(2): 245-251.

[48] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant[J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(3): 239–264.

[49] 肖春旺, 张新时. 模拟降水量变化对毛乌素油蒿幼苗生理生态过程的影响研究[J]. 林业科学, 2001, 37(1): 15–22. [Xiao Chunwang, Zhang Xinshi. Study on the effect of simulated pregipitation change on the physiological ecology process for *Artemisia ordosica* seedlings in Maowusu Sandland[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(1): 15–22.]

[50] 肖春旺, 董鸣, 周广胜, 等. 鄂尔多斯高原沙柳幼苗对模拟降水量变化的响应[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 171–176. [Xiao Chunwang, Dong Ming, Zhou Guangsheng, et al. Response of *Salix psammophila* seedlings to simulated precipitation change in Ordas plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 171–176.]

[51] Li Z, Zhang Y, Yu D, et al. The influence of precipitation regimes and elevated CO_2 on photosynthesis and biomass accumulation and partitioning in seedlings of the rhizomatous perennial grass *Leymus Chinensis*[J]. PloS One, 2014, 9(8): e103633.

[52] 吴茜, 丁佳, 闫慧, 等. 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山5个树种幼苗生长和生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 256–267. [Wu Qian, Ding Jia, Yan Hui, et al. Effects of simulated precipitation and nitrogen addition on seedling growth and biomass in five tree species in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(3): 256–267.]

[53] McCarthy M C, Enquist B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation[J]. Functional Ecology, 2007, 21(4): 713–720.

[54] 杨彪生, 单立山, 马静, 等. 红砂幼苗生长及根系形态特征对干旱−复水的响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 469–478. [Yang Biaosheng, Shan Lishan, Ma Jing, et al. Response of growth and root morphological characteristics of *Reaumuria soongorica* seedlings to drought-rehydration[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 469–478.]

Responses of seedling growth and biomass allocation of *Malus sieversii* to precipitation amount and precipitation interval

ZHANG Zongfang, XU Jiang, SHI Xiaojun

(College of Life Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: This study aimed to reveal the effects of different precipitation amount and precipitation interval on the growth of *Malus sieversii* seedlings. A two-factor control experiment was set up based on the average annual precipitation amount and precipitation interval in the experimental site. The three variations of precipitation amount were as follows: W (precipitation amount), W− (15% decrease of precipitation amount), and W+ (15% increase of precipitation amount). The two precipitation intervals were as follows: T (precipitation interval of 4 days) and T+ (precipitation interval of 8 days). Results showed that (1) under the same precipitation interval treatment, seedling basal diameter, leaf number, and above-and under-ground biomass increased with the increase in precipitation amount; (2) under the same precipitation amount treatment, T+ treatment can promote the elongation of the main roots and increase the root/shoot ratio; and (3) compared with W treatment, the relative growth rates of above-ground, under-ground, and total biomass under W+ treatment increased by 55.42%, 20.75%, and 34.43%, respectively. Prolonging the interval of precipitation will promote root growth and under-ground biomass accumulation of *M. sieversii* seedlings. Within a certain range of precipitation, the increase in precipitation amount can promote the growth and biomass accumulation of *M. sieversii.*

Keywords: *Malus sieversii*; precipitation amount; precipitation interval; seedling growth